

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170338

白刺幼苗生物量与氮含量在叶与全株间的尺度转换

邢磊¹ 薛海霞¹ 李清河¹ 高婷婷²

(1 中国林业科学研究院林业研究所,国家林业局林木培育重点实验室,北京 100091; 2 安丘市水利局,山东 潍坊 262100)

摘要:【目的】植物生物量和营养的分配模式是植物对生态系统中物质和能量循环的一种演变策略,其资源分配给不同构件的模式是其生物学特性的一个基本方面。本文目的为解决野外调查工作中植物整体生物量与养分含量难以测定等问题。【方法】以乌兰布和沙漠东北部唐古特白刺幼苗为研究对象,将其分为根、茎、叶3个主要组成部分,通过对这3个主要组成构件生物量的测定与拟合分析,以叶器官为变量,建立了白刺全株生物量的预测模型,并通过进一步测定其各部位氮含量,建立了其全株氮含量的预测模型,得出了白刺叶与全株不同尺度之间生物量与氮含量的缩放关系,探讨了白刺全株生物量与全株氮含量之间的相关关系。【结果】结果表明:以叶生物量对数转换值为自变量能够很好的拟合出根($R^2=0.9012, P<0.001$)和茎($R^2=0.9264, P<0.001$)的生物量;以叶氮含量为自变量也能够较好的拟合出根($R^2=0.8501, P<0.001$)和茎($R^2=0.8447, P<0.001$)的氮含量,进而得出以叶器官生物量为自变量的全株生物量预测模型: $M_p = M_L + 10^{0.0209} M_L^{0.8456} + 10^{0.4369} M_L^{0.8678}$,以及以叶器官生物量与氮含量为自变量的全株氮含量预测模型: $N_p = M_L N_L + 10^{0.0209} M_L^{0.8456} (0.1094 N_L + 0.0156) + 10^{0.4369} M_L^{0.8678} (0.1088 N_L + 0.0148)$,并经实测数据验证,白刺全株生物量与全株氮含量之间的相关关系可表达为: $\lg N_p = 1.0752 \lg M_p - 1.7684$ 。【结论】白刺通过某一构件的生物量与氮含量能够较好的预测出其全株生物量与全株氮含量之间的相关关系。

关键词:异速生长;生态化学计量;生物量;氮含量;白刺

中图分类号:Q948.1; S793; S718.55+6 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2018)02-0076-06

引文格式:邢磊,薛海霞,李清河,等.白刺幼苗生物量与氮含量在叶与全株间的尺度转换[J].北京林业大学学报,2018,40(2):76-81. Xing Lei, Xue Hai-xia, Li Qing-he, et al. Scaling from leaf to whole plant in biomass and nitrogen content of *Nitraria tangutorum* seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(2): 76-81.

Scaling from leaf to whole plant in biomass and nitrogen content of *Nitraria tangutorum* seedlings

Xing Lei¹ Xue Hai-xia¹ Li Qing-he¹ Gao Ting-ting²

(1. Research Institute of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Anqiu Municipal Water Resources Bureau, Weifang 262100, Shandong, China)

Abstract: [Objective] The relationship between the evolved strategies of plant species and the material and energy cycles of ecosystems is linked by plant biomass and nutrient allocation, and the pattern of plant resources allocated to its different components is a fundamental aspect of its biological characteristics. In this paper, the scaling from components to whole plant in biomass and nitrogen content of *Nitraria tangutorum* seedlings was researched in the northeast of Ulan Buh Desert, Inner Mongolia of northern China. [Method] Firstly, we measured the biomass of root, stem and leaf of *Nitraria*

收稿日期:2017-10-13 修回日期:2017-12-29

基金项目:国家自然科学基金项目(31470622)。

第一作者:邢磊。主要研究方向:植物逆境生理生态。Email:1762561840@qq.com 地址:100091 北京市海淀区香山南路东小府1号中国林业科学研究院林业研究所。

责任作者:李清河,研究员,博士生导师。主要研究方向:植物逆境生理生态、植物生殖生态等。Email:tsinghel@caf.ac.cn 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

tangutorum, individually, and we converted them into a value of logarithm (base 10) to get the linear fitting equation of the stem biomass or root biomass taking leaf biomass as variable. Then we measured the nitrogen concentration of each component, also, we linearly fitted the nitrogen concentration of the leaf and the stem or root for further study. [**Result**] The results showed that the biomass of stem and root could be predicted accurately by giving the leaf biomass (R^2 of root-leaf and stem-leaf regression equations were 0.901 2 and 0.926 4, respectively). And the nitrogen concentration of root and stem also could be predicted well by giving the leaf nitrogen concentration too (R^2 of root-leaf and stem-leaf regression equations was 0.850 1 and 0.844 7, respectively). Then we obtained the prediction model of the whole plant biomass by adding the three parts of plant: $M_p = M_L + 10^{0.020\ 9} M_L^{0.845\ 6} + 10^{0.436\ 9} M_L^{0.867\ 8}$, and we inferred the nitrogen content predicting model of whole plant by adding the three parts together similarly: $N_p = M_L N_L + 10^{0.020\ 9} M_L^{0.845\ 6} (0.109\ 4 N_L + 0.015\ 6) + 10^{0.436\ 9} M_L^{0.867\ 8} (0.108\ 8 N_L + 0.014\ 8)$. And through the field data verifying, it was showed that the relationship between the biomass and nitrogen content of whole plant could be predicted by the biomass and nitrogen concentration of *Nitraria tangutorum* leaves: $\lg N'_p = 1.075\ 2 \lg M'_p - 1.768\ 4$. [**Conclusion**] It was showed that the biomass and nitrogen content of the whole plant of *Nitraria tangutorum* can be predicted by its components.

Key words: allometry; ecological stoichiometry; biomass; nitrogen content; *Nitraria tangutorum*

植物生物量和营养分配将植物的演变策略与生态系统的物质和能量循环联系起来^[1],其资源(包括生物量)分配给不同构件的模式是其生物学特性的一个基本方面^[2]。一般的异速生长模型已被推导为预测种子植物根、茎、叶生物量之间的种内和种间尺度关系^[3-4]。异速生长关系能够揭示植物的整体与部分或部分与部分之间的比列关系,是植物自身相对生长速率的一种适应^[5-6],其分配理论认为植物根、茎、叶或地上部分与地下部分的生物量是按规律(不同比例)缩放的^[7]。同时,异速生长关系是连接植物生物量分配与器官大小及功能的一个重要指标,通过对数化减弱了单纯使用生物量的绝对值或比例系数带来的不稳定性,能揭示与尺度无关的植物器官生物量分配规律^[8]。植株的养分含量由其各构件的养分含量所组成,而大量的研究表明植物各构件之间的养分浓度通常存在一定的相关性,如 Kerkhoff 等^[1]汇总了全球 152 个种子植物家系中 1 287 种植物的根、茎、叶和生殖器官的研究,表明 N、P 含量(包括 N:P)在不同器官间通常高度相关;Niklas 等^[9]基于 131 种维管植物的研究表明,叶氮正比于叶磷的 3/4 次幂,而且在植物由初生生长到次生生长过程中,氮磷比会发生变化;Elser 等^[10]就植物某一构件到全株的生物量及化学计量问题做了一定的探讨,并前人的基础上总结提出了关于全株生物量以及全株氮含量的关系模型,为探讨植物的从某一构件到全株的养分含量关系提供了理论基础。

唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*),又名白刺,

是我国西北荒漠、半荒漠植被的重要建群种之一^[11],具有萌生能力强,沙土覆埋后可产生大量不定根以形成新的植株,并会进一步拦截固定风沙形成白刺沙包的生长特性^[12-14]。本研究以白刺为研究对象,结合异速生长理论与生态化学计量理论,从植株生物量与营养分配策略的角度出发,通过白刺植株不同构件之间的内在联系,以叶器官为变量,分别拟合出全株生物量与全株氮含量的预测模型。并以实际测定的全株生物量与氮含量为对照,验证是否可以通过某一构件的生物量和氮含量建立全株生物量与全株氮含量的模型,并探讨全株生物量与氮含量之间的相关关系,以期为进一步解决白刺灌丛氮含量的估计提供一种思路。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

试验地点位于内蒙古西部乌兰布和沙漠东北缘磴口县境内的中国林业科学研究院沙漠林业实验中心下属分场,该地区气候属于亚洲中部温带荒漠气候,兼有大陆性和季风降雨气候特点,其特征是冬季寒冷漫长,春秋短暂,夏季炎热,降雨量少,日照充足,热量丰富,昼夜温差大,积温高,无霜期短。日照时数 3 300 h 以上,无霜期在 136 ~ 205 d 之间,年平均气温 7.6 °C,年平均降雨量为 149.0 mm,主要集中在 7—9 月份,年平均蒸发量 2 351.9 mm。

1.2 试验材料

试验所用的植物材料选用 2015 年 4 月初定植于试验苗圃地的 2 年生白刺植株,株行距为 1 m ×

1.5 m。苗圃地基质为搅拌均匀的当地黄沙。2015 年 9 月,在白刺生长季末期随机选取 33 株,利用全挖法,初步去除沙土后,用信封盛装带回试验室,洗净表土后将根、茎、叶分离并置于 75 ℃ 烘箱烘至恒质量(24 h),测定干质量后粉碎研磨,过 100 目筛,用塑封袋封存,用于氮含量测定。氮含量测定参照《中华人民共和国林业行业标准 LY/T—1999》,先用 H₂SO₄-H₂O₂对样品进行消煮,直至颜色变为清澈透明,再用凯式定氮法测定。

1.3 数据分析

植株的总生物量即各构件的生物量之和;植株的总氮含量由各构件的生物量与氮含量所决定,即各构件的氮含量之和。

$$M_p = M_L + M_S + M_R \tag{1}$$

$$N_p = M_L N_L + M_S N_S + M_R N_R \tag{2}$$

式中: M_p 为全株生物量; N_p 为全株氮含量; M_L 为叶片生物量; M_S 为茎生物量; M_R 为根生物量; N_L 为叶片氮含量; N_S 为茎氮含量; N_R 为根氮含量。

试验数据和图像用 Excel 2010 处理,用 SPSS 19.0 分别对各指标间的相关关系进行拟合,用协方差与最大似然比检验各方程的拟合程度。对生物量间的异速生长关系用常用对数转换后再进行分析。

2 结果与分析

2.1 白刺植株叶与根、茎生物量间的异速生长关系

对白刺各构件生物量的测定的均值大小为 $M_S = 36.465 > M_L = 19.815 > M_R = 13.055$,三者所占的生物量分配比例为 52.59%、28.58%、18.83%,多重比较结果表明茎生物量显著大于叶 ($P < 0.001$)、根 ($P < 0.001$) 的生物量,而叶、根之间生物量无显著性差异 ($P = 0.063 > 0.05$)。以白刺叶片生物量 (M_L) 的对数转化值为横坐标,根生物量 (M_R) 的对数转化值为纵坐标,拟合出 M_L 、 M_R 之间的异速生长关系;同理,以叶片生物量 (M_L) 的对数转化值为横坐标,茎生物量 (M_S) 的对数转化值为纵坐标拟合出白刺 M_L 、 M_S 之间的异速生长关系(图 1)。

由线性拟合及似然比检验得出,白刺叶片生物量与茎生物量、根生物量之间均存在异速生长关系,根、茎生物量与叶片生物量的拟合方程分别为:

$$\lg M_R = 0.8456 \lg M_L + 0.0209 \tag{3}$$

$$\lg M_S = 0.8678 \lg M_L + 0.4369 \tag{4}$$

由图 1 可知,白刺植株的根生物量、茎生物量与叶片生物量之间均呈现正相关关系,而且根生物量与叶片生物量间的异速生长常数 ($10^{0.0209}$) 与平衡指数 (0.8456) 均小于茎生物量与叶片生物量间的

($10^{0.4369}$ 、0.8678)。

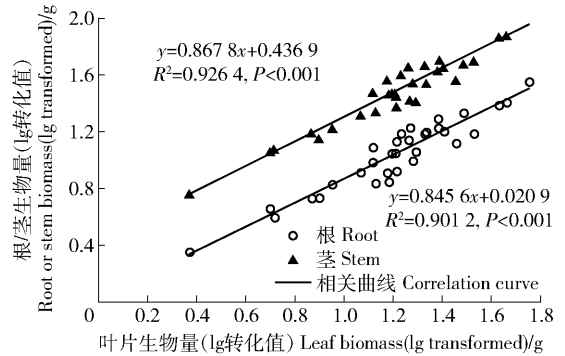


图 1 白刺根、茎生物量与叶片生物量的异速生长关系

Fig. 1 Allometry relationship between root, stem biomass and leaf biomass of *Nitraria tangutorum*

2.2 白刺全株生物量的预测模型

将式(3)、(4)代入式(1)中可得出白刺全株生物量的预测模型:

$$M_p = M_L + 10^{0.0209} M_L^{0.8456} + 10^{0.4369} M_L^{0.8678} \tag{5}$$

将实际测得的 M_L 代入式(5)可得出全株生物量的模拟值 M'_p ;将实测的 M_L 、 M_S 、 M_R 代入式(1)得出全株生物量 M_p ,为对照,如图 2 所示,以 M_L 为自变量, M_p 和 M'_p 为因变量,可拟合出的两条几乎重合直线。对 M_p 和 M'_p 分别与 M_L 拟合的线性关系的斜率和截距分别进行显著性比较,发现 2 个方程的斜率以及截距之间均无显著性差异 ($P = 0.210 > 0.05$, $P = 0.544 > 0.05$),表明式(5)可以较好的预测出白刺植株的生物量。

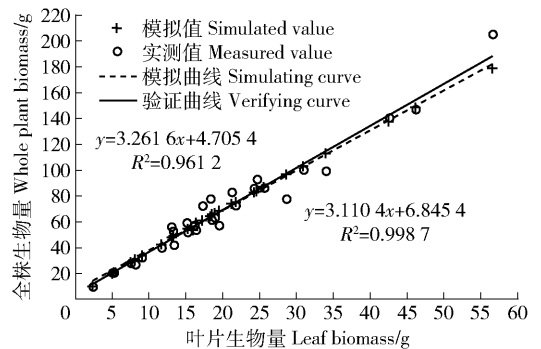


图 2 白刺全株生物量与叶片生物量间的模拟曲线与验证曲线

Fig. 2 Simulating and verifying curves between whole plant biomass and leaf biomass of *Nitraria tangutorum*

2.3 白刺植株各构件氮含量间的线性拟合

以叶片氮含量 (N_L) 为横坐标,根氮含量 (N_R) 为纵坐标,拟合出白刺幼苗 N_L 、 N_R 之间的相关关系。同理,以叶片氮含量 (N_L) 为横坐标,茎氮含量 (N_S) 为纵坐标,拟合出白刺幼苗 N_L 、 N_S 之间的相关关系(图 3)。

通过拟合及似然比检验得出叶片与根的氮含量之间存在线性关系:

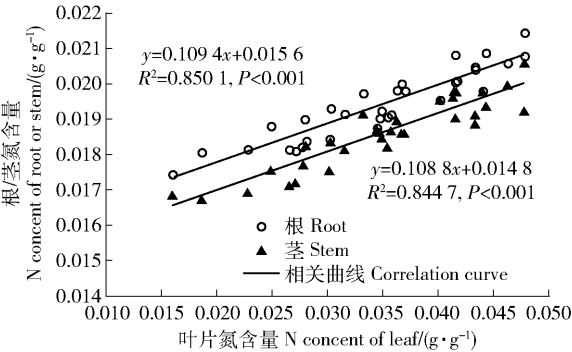


图3 白刺根、茎氮含量与叶氮含量间的线性拟合关系
Fig. 3 Linear fitting relations between N content of root , stem and that of leaf for *Nitraria tangutorum*

$$N_R = 0.1094N_L + 0.0156 \tag{6}$$

叶片与茎的氮含量之间也存在线性关系：

$$N_S = 0.1088N_L + 0.0148 \tag{7}$$

从图3可看出白刺根和茎的氮含量与叶片氮含量均呈现正相关关系,而且两者的斜率都很小且相近(0.1094和0.1088),表明其氮含量主要由常数项0.0156和0.0148决定。相对于叶氮含量,根和茎的氮含量变化较小,较为稳定,其中各构件氮含量均值大小为: $N_L = 0.0349 > N_R = 0.0194 > N_S = 0.0186$,多重比较表明叶氮含量极显著高于根($P < 0.001$)和茎($P < 0.001$)的,而根茎之间无显著性差异($P = 0.497 > 0.05$)。

2.4 全株氮含量与生物量之间相关关系的拟合验证

将式(3)、(4)、(6)、(7)代入式(2)中可得出白刺全株氮含量的预测模型：

$$N_p = M_L N_L + 10^{0.0209} M_L^{0.8456} (0.1094N_L + 0.0156) + 10^{0.4369} M_L^{0.8678} (0.1088N_L + 0.0148) \tag{8}$$

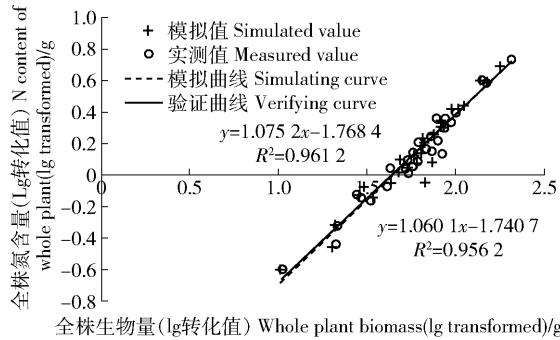


图4 白刺全株氮含量与全株生物量间的模拟曲线与验证曲线
Fig. 4 Simulating and verifying curves between whole plant N content and whole plant biomass of *Nitraria tangutorum*

将实际测定所得的 M_L 、 M_S 、 M_R 、 N_L 、 N_S 、 N_R 代入式(1)与式(2)中,可得出全株生物量与氮含量的实测值 M_p 、 N_p ;同时将实际测定所得的 M_L 、 N_L 代入式

(5)与(8)中得出全株生物量与氮含量的模拟值 M'_p 、 N'_p ,如图4所示,对2组数据进行拟合得出：

$$\lg N_p = 1.0601 \lg M_p - 1.7407 \tag{9}$$

$$\lg N'_p = 1.0752 \lg M'_p - 1.7684 \tag{10}$$

对模拟曲线与验证曲线之间的斜率和截距分别进行显著性比较,发现两个曲线的斜率之间无显著性差异($P = 0.789 > 0.05$),截距之间也无显著性差异($P = 0.947 > 0.05$),表明预测模型(8)没有改变全株生物量与全株氮含量之间的缩放比例关系,而且能够较好的预测白刺全株氮含量。

3 讨 论

3.1 白刺植株各构件生物量及氮含量的分配

生物量是植物的基本生物学特征和功能性状之一,是物质和能量积累的基本体现也是生态系统生产力的直观体现^[15]。植物生物量分配伴随着植物生活史的每一个阶段,生物量的分配模式是植物对环境适应的结果,影响着植物的生长和发育^[16-17]。对于沙漠生态系统而言掌握植物的生物量是充分了解其动态和对其适当管理的基本和必要步骤^[18-19]。本研究关于乌兰布和沙漠东北部唐古特白刺幼苗各构件生物量之间的生长关系的结果表明:其根与叶生物量间的异速生长常数($10^{0.0209}$)与平衡常数(0.8456)均小于茎与叶生物量间的($10^{0.4369}$ 、0.8678),即叶生物量的变化量一定时,茎生物量的变化量要大于根生物量的变化量。这可能是由于白刺独特的生长特性所造成的,即在植株成长的过程中,地上部分会逐渐的被风沙覆盖,茎上会形成大量不定根,以促使地上部分(枝、叶)更好的生长^[12-14]。而相比于茎,大部分根系特别是活力旺盛的细根,则处于不断地周转过程中,同时地下茎也在一定程度上取代了粗根的作用,因此这种对特定生长环境的适应造成了其独特的生物量分配模式为茎>叶>根。当然也不排除随着植株的增大,在收获其各构件生物量的实际操作过程中,损失的根的生物量要多于茎的可能性^[5]。

氮是叶绿素和光合蛋白合成的重要成分,且大部分都用于光合器官的构建,因此它是光合物质代谢和植物生长的关键性因子^[20-21]。作为植物最重要的生源要素之一,植物氮含量是研究植物多种生理特性的重要指标。本文通过白刺不同构件之间氮含量的拟合得出: $N_R = 0.1074N_L + 0.014$ 、 $N_S = 0.1039N_L + 0.0125$ 。由拟合公式可知,植株根、茎的氮含量与叶氮含量呈正相关关系,且分析表明二者的氮含量显著小于叶氮含量($P < 0.001$)。这是因为叶是植物体进行光合作用的主要器官,含有植

物体绝大部分的叶绿体,而叶绿体中约有植物 75% 的氮^[22];但由于白刺茎生物量的分配占全株生物量的 52.59%, 所以导致其氮含量所占比例大幅上升, 最终三者的氮含量分配模比列为叶 (43.59%) > 茎 (41.07%) > 根 (15.38%)。

3.2 白刺全株生物量、氮含量模型及其之间的相互关系

关于白刺的生物量模型,贾宝全等^[12]曾以白刺灌丛所在沙包的长、宽、高为指标,对白刺灌丛的生物量建立了回归预测某型,但此方法仅适用于已经成型的沙包。何炎红等^[22]曾将白刺的地上部分细分为新枝、老枝 (I、II)、枯枝等,建立了其与生物量、枝高、地径的关系模型,而对其地下生物量的研究没有涉及。魏小平等^[19]以白刺灌丛的冠幅指标,建立了其与白刺灌丛地上生物量 (干质量)、地下生物量 (鲜质量) 以及全株生物量 (干质量与鲜质量) 的拟合模型。与以上研究不同的是本研究从植株生物量分配策略的角度出发,结合异速生长理论,通过白刺植株不同构件之间的内在联系,以其叶生物量的对数转换值为变量,与根、茎生物量的对数转换值线性拟合,得出白刺全株生物量的预测模型: $M_p = M_L + 10^{0.0209} M_L^{0.8456} + 10^{0.4369} M_L^{0.8678}$ 。在以上基础上,通过白刺不同构件氮含量的测定并拟合得到其根、茎与叶之间的氮含量函数关系式,将其进一步与它们之间的生物量函数关系式结合,得出了白刺植株氮含量的预测模型: $N_p = M_L N_L + 10^{0.0209} M_L^{0.8456} (0.1094 N_L + 0.0156) + 10^{0.4369} M_L^{0.8678} (0.1088 N_L + 0.0148)$ 。

经实测数据验证,模拟模型 $\lg N'_p = 1.0752 \lg M'_p - 1.7684$ 能够较好的反应白刺植株全株生物量与全株氮含量之间的缩放关系,即表明白刺可以通过不同构建之间的内在联系,由某一构件的生物量和氮含量预测全株生物量与全株氮含量的相关关系。由模拟模型的表达式可知,无论是模拟曲线还是验证曲线,其平衡指数都十分接近 1 (1.0752、1.0601), 表明白刺植株的全株氮含量与全株生物量之间的缩放关系受个体大小的影响较小;这与 Niklas 等^[23]人基于大型数据库统计分析的研究结果一致。而 Kerkhoff 等^[1]认为植物叶片的营养成分与植株形态大小无显著相关,但大型木本植物在生长发育过程中随着木质化程度积累,根、茎中的养分比例会逐渐降低。分析原因,可能是白刺为沙生灌木,其随着其植株的生长,相比于木质化过程的积累,其更多的资源会分配于萌生新的分株。

4 结 论

进化历史的偶然性和一定程度的环境趋同性导

致了一组共同的规律,而这些规律则限制了植物器官之间的营养物质分配^[1,23]。对乌兰布和沙漠东北部唐古特白刺幼苗的研究发现其植株根、茎、叶构件之间生物量与氮含量之间均存在一定的相关关系。以叶性状为自变量可得出根、茎生物量的表达式: $\lg M_R = 0.8456 \lg M_L + 0.0209$, $\lg M_S = 0.8678 \lg M_L + 0.4369$;及氮含量的表达式: $N_R = 0.1094 N_L + 0.0156$, $N_S = 0.1088 N_L + 0.0148$;进而得出全株生物量及氮含量的预测模型: $M_p = M_L + 10^{0.0209} M_L^{0.8456} + 10^{0.4369} M_L^{0.8678}$, $N_p = M_L N_L + 10^{0.0209} M_L^{0.8456} (0.1094 N_L + 0.0156) + 10^{0.4369} M_L^{0.8678} (0.1088 N_L + 0.0148)$ 。白刺全株氮含量与生物量之间相关关系的拟合验证表明:其全株生物量与全株氮含量之间的相关关系可由其叶片与全株之间的内在联系表达为 $\lg N'_p = 1.0752 \lg M'_p - 1.7684$ 。研究为解决植物全株生物量难以测定的问题提供了一种方法,也为进一步估测植物养分含量提供了一种思路。

参 考 文 献

[1] Kerkhoff A J, Fagan W F, Elser J J, et al. Phylogenetic and growth form variation in the scaling of nitrogen and phosphorus in the seed plants[J]. The American Naturalist, 2006, 168(4): E103-E122.

[2] Klinkhamer P G L, Meelis E, DeJong T J, et al. On the analysis of size-dependent reproductive output in plants[J]. Functional Ecology, 1992, 6(3): 308-316.

[3] Enquist B J, Niklas K J. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants[J]. Science, 2002, 295(5559): 1517-1520.

[4] Niu K C, Choler P, Zhao B B, et al. The allometry of reproductive biomass in response to land use in Tibetan alpine grasslands[J]. Functional Ecology, 2009, 23(2): 274-283.

[5] Niklas K J. Modelling below-and above-ground biomass for non-woody and woody plants[J]. Annals of Botany, 2004, 95(2): 315-321.

[6] 程栋梁, 钟全林, 林茂兹, 等. 植物代谢速率与个体生物量关系研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2312-2320.

Cheng D L, Zhong Q L, Lin M Z, et al. The advance of allometric studies on plant metabolic rates and biomass[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2312-2320.

[7] Cheng D L, Ma Y Z, Zhong Q L, et al. Allometric scaling relationship between above-and below-ground biomass within and across five woody seedlings[J]. Ecology and Evolution, 2014, 4(20): 3968-3977.

[8] 李春萍, 李刚, 肖春旺. 异速生长关系在陆地生态系统生物量估测中的应用[J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(2): 51-57.

Li C P, Li G, Xiao C W. The application of allometric relationships in biomass estimation in terrestrial ecosystems[J]. World SCI-Tech R & D, 2007, 29(2): 51-57.

[9] Niklas K J, Owens T, Reich P B, et al. Nitrogen/phosphorus leaf

stoichiometry and the scaling of plant growth[J]. Ecology Letters, 2005, 8(6): 636-642.

[10] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, et al. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change[J]. New Phytologist, 2010, 186(3): 593-608.

[11] 李清河, 江泽平. 白刺研究[M]. 北京:中国林业出版社, 2011.

Li Q H, Jiang Z P. Research on plant species of genus *Nitraria* L. [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011.

[12] 贾宝全, 蔡体久, 高志海, 等. 白刺灌丛沙包生物量的预测模型[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(1): 96-99.

Jia B Q, Cai T J, Gao Z H, et al. Biomass forecast models of *Nitraria tangutorum* shrub in sand dune[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(1): 96-99.

[13] 马全林, 卢琦, 魏林源, 等. 干旱荒漠白刺灌丛植被演替过程土壤种子库变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2285-2294.

Ma Q L, Lu Q, Wei L Y, et al. Varying characteristics of soil seed banks during the succession process of *Nitraria tangutorum* vegetation in an arid desert area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2285-2294.

[14] 彭飞, 王涛, 刘立超, 等. 民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆演化阶段及其空间格局[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 593-599.

Peng F, Wang T, Liu L C, et al. Evolution phases and spatial pattern of nebkhas in Minqin Desert-oasis ectone[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(3): 593-599.

[15] 张峰, 上官铁梁, 李素珍. 关于灌木生物量建模方法的改进[J]. 生态学杂志, 1993(6): 67-69.

Zhang F, Shangguan T L, Li S Z. Improvement on modelling method of biomass of brush[J]. Chinese Journal of Ecology, 1993(6): 67-69.

[16] Bonser S P, Aarssen L W. Interpreting reproductive allometry: individual strategies of allocation explain size-dependent reproduction in plant populations[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2009, 11(1): 31-40.

[17] Poorter H, Niklas K J, Reich P B, et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control[J]. New Phytologist, 2012, 193(1): 30-50.

[18] Bai Y F, Han X G, Wu J G, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland[J]. Nature, 2004, 431: 181-184.

[19] 魏小平, 赵长明, 王根轩, 等. 民勤荒漠绿洲过渡带优势植物地上和地下生物量的估测模型[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 878-883.

Wei X P, Zhao C M, Wang G X, et al. Estimation of above-and below-ground biomass of dominant desert plant species in an oasis-desert ecotone of Mingqin, China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(6): 878-883.

[20] Takashima T, Hikosaka K, Hirose T. Photosynthesis or persistence: nitrogen allocation in leaves of evergreen and deciduous *Quercus* species[J]. Plant, Cell & Environment, 2004, 27(8): 1047-1054.

[21] 郑淑霞, 上官周平. 不同功能型植物光合特性及其与叶氮含量、比叶重的关系[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 171-181.

Zheng S X, Shangguan Z P. Photosynthetic characteristics and their relationships with leaf nitrogen content and leaf mass per area in different plant functional types[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2007, 27(1): 171-181.

[22] 何炎红, 田有亮, 叶冬梅, 等. 白刺地上生物量关系模型及其与叶面积关系的研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 541-546.

He Y H, Tian Y L, Ye D M, et al. Model of aboveground biomass of *Nitraria tangutorum* and relationship between biomass and leaf area[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(4): 541-546.

[23] Niklas K J, Enquist B J. Canonical rules for plant organ biomass partitioning and annual allocation[J]. American Journal of Botany, 2002, 89(5): 812-819.

(责任编辑 赵勃
责任编委 李景文)